

Ionimoottorit

Jere Koponen

Luk-tutkielma

Fysiikan tutkinto-ohjelma

Oulun yliopisto

Huhtikuu 2020

Sisältö

1	Johdanto	3
1.1	Historia	3
2	Ioni- ja rakettimoottoreiden teoriaa	4
3	Rakettimoottorit	5
4	Sähköstaattiset ionimoottorit	5
4.1	Verkkoionimoottori	6
4.1.1	Toimintaperiaate	6
4.1.2	Ionien kiihdyttäminen	7
4.1.3	Plasmageneraattorit	9
4.2	Hall-ilmiöön perustuva ionimoottori	11
4.2.1	Rakenne ja toimintaperiaate	12
5	Sähkötermiset moottorit	14
5.1	Resistorit	15
5.2	Arcjet	15
5.3	Induktiolla ja säteilyllä lämpöä tuottavat laitteet	16
6	Sähkömagneettiset ionimoottorit	16
6.1	Magnetoplasma dynaaminen ionimoottori	17
6.2	Muunneltavan ominaisimpulssin magnetoplasmaraketti	19
7	Johtopäätökset	20
	Viitteet	20

1 Johdanto

1.1 Historia

Sähköllä tuotetun työntövoiman juuret juontavat 1900-luvun alkuun, jolloin Konstantin Tsiolkovski ja Robert Goddard keksivät sähköisen työntövoiman käytön lähes yhtäaikaisesti. Tsiolkovski julkaisi vuonna 1903 artikkelin, johon hän oli johtanut rakettiyhtälön, joka mahdollisti rakettien teoreettisen tarkastelun. Vuonna 1911 Tsiolkovski mainitsi julkaisussaan sähköisen työntövoiman idean, jossa hän kuvaili kuinka paljon nopeampia katodisäteiden elektronit olivat kemiallisien rakettien pakoaineisiin verrattuna.[1]

Vuonna 1906 fyysikko Robert Goddard yhdisti sähköön keskittyvän työuransa ja hänen henkilökohtaisen kiinnostuksensa propulsioon. Tämä jäi kuitenkin vain ajatuksen tasolle, jonka hän kirjasi muihinpanoihinsa eikä hän tuonut niitä julkisesti esille. Vuonna 1917 Goddard kehitti laitteen, jota voisi kutsua ensimmäiseksi sähköstaattiseksi ionimoottoriksi. Hermann Oberthin vuonna 1929 julkaisemassa *Wege Zur Raumschiffahrt* ("Tie avaruusmatkustamiseen") kirjassa oli esitelty useita eri malleja sähköiselle työntövoimalle, joka toi esille sähköisen työntövoiman rakettitieteen maailmassa.[1]

Tämän kirjan jälkeen sähköisen työntövoiman tutkiminen ja kehitys loppui lähes kokonaan, kunnes kylmä sota ja Yhdysvaltojen ja Neuvostoliiton välinen avaruuskilpailu loi tarvetta uusille tavoille liikuttaa laitteistoa avaruudessa. Tähän tarkoitukseen sähköiset työntövoimanlähteet soveltuvat paremmin muihin työntövoimanlähteisiin verrattuna. Ensimmäiset kokeelliset ionimoottorit lähetettiin avaruuteen 1960-luvun alussa. Nämä moottorit käyttivät ajoaineenaan cesiumia ja elohopeaa. Samoihin aikoihin Hall-ilmioon perustuvia ionimoottoreita kehitettiin Neuvostoliitossa, kun taas Yhdysvalloissa keskityttiin verkkoionimoottoreihin.[2,3]

Viimeisen 30 vuoden aikana ionimoottoreiden käyttö avaruudessa on kasvanut tasaisesti. Ionimoottoreita käytetään pitämään satelliitteja geosynkronisella radalla tai hienosäätämään niiden paikkaa ja asentoa kemiallisten rakettimoottorien sijasta. Ionimoottorit ovat myös pääasiallisena työntövoiman

lähteinä monille ulkoavaruuteen matkustavilla laitteilla, kuten avaruusluotaimille.[2,3]

2 Ioni-ja rakettimoottoreiden teoriaa

Rakettimoottorista purkautuva kaasusuihku aiheuttaa rakettiin työntövoiman, joka on yhtä suuri mutta vastakkaisuuntainen, kuin kaasusuihkuja raketesta poispäin kiihdyttävä voima. Koska rakettimoottorin massa muuttuu sen polttoaineen kulutuksen mukaan, niin työntövoima on määritelty liikemäärän muutoksena ajan suhteen.

$$T = \frac{d}{dt}(m_p v_{ex}) = \frac{dm_p}{dt} v_{ex} = \dot{m}_p v_{ex}, \quad (1)$$

missä T on työntö, v_{ex} on pakonopeus, m_p on ajoaineen massa, \dot{m}_p on ajoaineen massavirtausnopeus $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$.

Tsiolkovskin rakettiyhtälö on yhtälö, mikä kuvaa raketin tapaisen laitteen liikettä. Raketin tapainen laite on laite, joka kiihdyttää itseään työntövoimalla poistamalla osan massastaan suurilla nopeuksilla ja liikemäärän säilymisen seurauksena laite liikkuu. Rakettiyhtälö on

$$\Delta v = v_{ex} \ln \left(\frac{m_l}{m_a} \right), \quad (2)$$

missä Δv on raketin suurin nopeuden muutos, ilman muita vaikuttavia voimia, v_{ex} on pakonopeus, m_a on kokonaismassa kiihdytyksen alussa ja m_l kokonaismassa kiihdytyksen lopussa.

Rakettimoottorin hyötysuhdetta kuvaa ominaisimpulssi ja se on määritelty työntövoiman ja ajoaineen kulutuksen suhteen. Ominaisimpulssi vakiotyöntövoimalle ja vakioajoaineenkulutukselle on

$$I_{sp} = \frac{T}{\dot{m}_p \cdot g} = \frac{v_{ex}}{g}, \quad (3)$$

missä T on työntövoima, \dot{m}_p ajoaineen massavirta, g on normaaliputoamis-

kiihtyvyys ja v_{ex} on pakonopeus. Korkealla ominaisimpulssilla saadaan enemmän työntöä ajoaineesta, kuten kaavasta 3 nähdään.[4,5,6]

3 Rakettimoottorit

Rakettimoottorit ovat reaktimoottoreita, jotka muuttavat polttoainetta korkeanopeuksiseksi pakoaineeksi, suihkuksi, joka tuottaa työntöä Newtonin 3.lain mukaan. Yleisesti tämä tapahtuu polttoainetta polttamalla. Ihanteellinen pakoaine on vety, johtuen vedyn keveydestä, mutta palamisreaktion tuotteena muodostuu yleensä raskaampia kaasuja vähentäen poistonopeutta. Rakettimoottorit kantavat oman polttoaineensa sekä hapettimensa mahdollistaen toiminnan tyhjiössä ja täten soveltuvat hyvin käytettäväksi avaruudessa.[5] Rakettimoottorit tuottavat paljon enemmän työntöä suhteellisen keveytensä takia verrattuna ionimoottoreihin ja muihin reaktimoottoreihin. Huonona puolena rakettimoottoreilla on niiden pieni ominaisimpulssi (300-450 s vrt. verkkoionimoottorien 2500-3600 s) johtuen pakoaineen hitaasta nopeudesta verrattuna ionimoottoreihin (2500-5000 m/s ja 20 000-100 000 m/s).[2] Rakettimoottorit eroavat myös ionimoottoreista hyötysuhteessa toimintatapsansa takia. Kemialliset rakettimoottorit ovat toimintaperiaatteeltaan lämpövoimakoneita, joten niiden hyötysuhteet (35%) jäävät pienemmiksi kuin ionimoottoreilla, jotka toimivat sähköllä, jolla saadaan suurempi hyötysuhde (40-90%).[2] Rakettimoottorien hyötysuhdetta voidaan kuitenkin kasvattaa nopeutta kasvattamalla, eli käyttämällä hyväksi Oberthin ilmiötä.[7]

4 Sähköstaattiset ionimoottorit

Sähköstaattiset ionimoottorit ovat yksi ionimoottorien alalaji. Sähköstaattisilla ionimoottorilla on useita eri toimintaperiaatteita, mutta niillä on muutamia yleisiä ominaisuuksia. Ajoaineena käyttävän aineen pitää olla helposti ionisoituvaa ja sillä pitää olla korkea massa-varaussuhde, jonka takia jo suhteellisen pienillä potentiaalieroilla saadaan aikaan suuria poistonopeuksia. Ajoaineella tulisi olla korkea massa-ionisaatioenergia suhde, jotta ajoaineen

ionisoinnilla olisi mahdollisimman korkea hyötysuhde. Ajoaineen tulisi olla halpa, myrkytön eikä se saisi kuluttaa (erosion) ionimoottorin osia. Näiden vaatimusten takia ajoaineena käytetään yleisesti ksenonia (Xe). Ksenonin käytön hyvät puolet ovat neutraalius, matala paineistettu massa (suuri tiheys matalissa lämpötiloissa) ja pieni ionisoitumisenergia, mutta huonona puolena on sen kallis hinta. Muita ajoaineta joita käytetään on argon, elohopea, krypton ja jodi.[2] Ioneita tuotetaan yleensä ionisoimalla ajoainetta onttokatodilla, joka tuottaa korkeaenergisiä elektroneja. Ionisaation jälkeen ioneja kiihdytetään korkeassa sähkökentässä Coulombin lain mukaan suuriin nopeuksiin. Tämä suuri poistonopeus saa aikaan suuren ominaisimpulssin, eli ionimoottorit käyttävät vähemmän ajoainetta tiettyä nopeuden muutosta kohti, kuin rakettimoottorit, joiden ominaisimpulssit ovat pieniä. Yleistä näille ionimoottoreille on myös neutralisoijat, jotka neutralisoivat ionit tuottamalla elektroneja, jolla estetään ioneja palaasta takaisin ionimoottorille vähentäen mahdollista työntövoimaa. Tutustutaan tarkemmin kahteen yleisesti käytössä olevaan sähköstaattiseen ionimoottoriin, verkkoionimoottoriin (gridded ion thruster) ja Hall ilmiöön perustuvaan ionimoottoriin (Hall-effect thruster).[2,3,6,9]

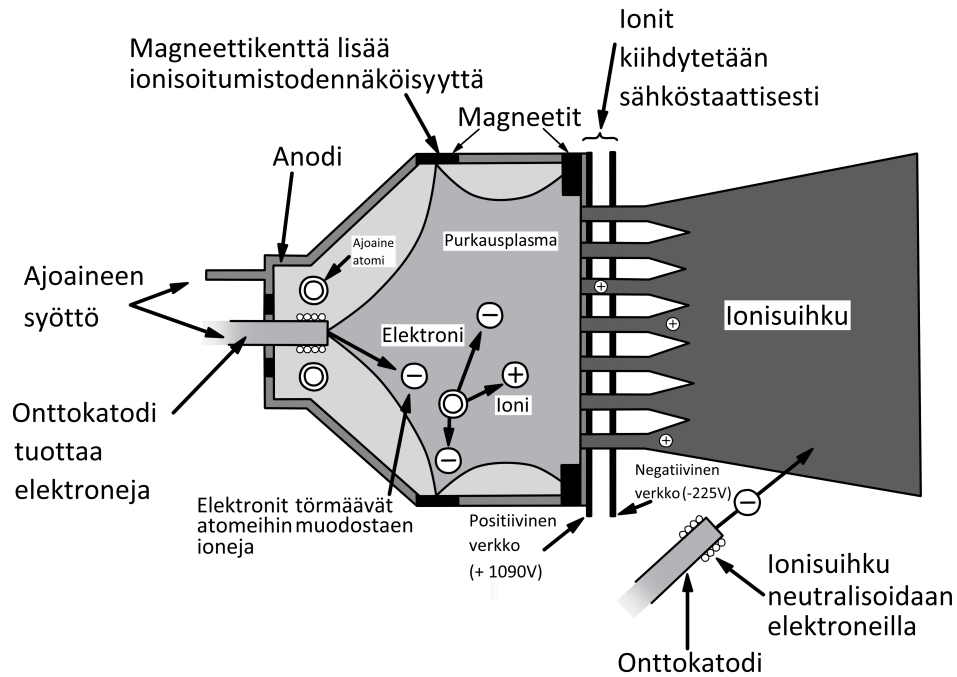
4.1 Verkkoionimoottori

Verkkoionimoottori on yksi yleisimmin käytettävistä sähköstaattisista ionimoottoreista. Nimensä nämä moottorit saavat ioneja kiihdyttävästä verkosta, jossa suuri sähköinen potentiaali kiihdyttää ioneja suuriin nopeuksiin (yli 30 km/s).[2] Kuvassa 1 on kaaviokuva verkkoionimoottorin rakenteesta.

4.1.1 Toimintaperiaate

Ajoaine syötetään venttiilistä ionimoottorin sisällä olevaan kammioon, jossa se ionisoidaan onttokatodin lämmittämisessä (terminen emissio) syntyvillä elektroneilla. Poistuttuaan katodilta korkeaenergiset elektronit pyrkivät kammion seinille, jotka toimivat anodina, jolloin ne törmäävät neutraaliin ajoaineeseen ionisoiden sen ja muodostaen plasmaa. Anodiseinään on lisätty magneetteja, joiden muodostamien magneettikenttien avulla voidaan lisä-

tä elektronien matkaa anodille nostaen ionisoitumistodennäköisyyttä. Ionisoitumisen jälkeen plasma vedetään verkoille, joiden välinen potentiaaliero kiihdyttää ionit suuriin poistonepeuksiin. Tämän jälkeen ionisuihku neutralisoidaan ionimoottorin ulkopuolisen katodin avulla.[2,3,6,8]



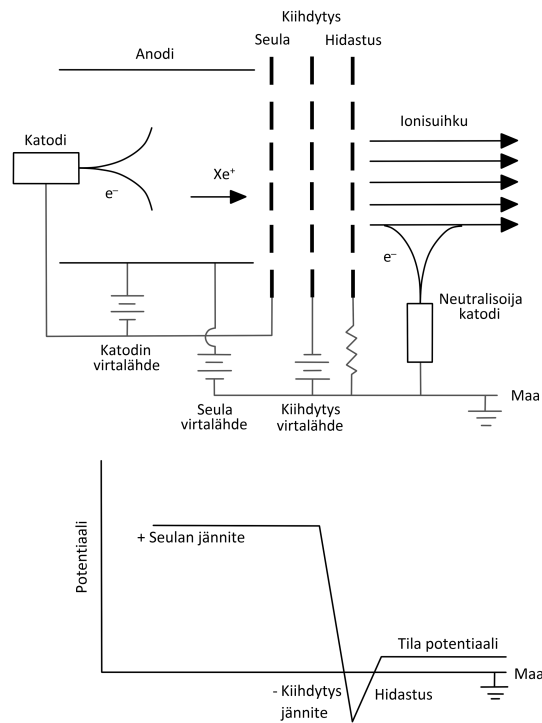
Kuva 1: Verkkoionimoottorin rakenne, [9]

4.1.2 Ionien kiihdyttäminen

Verkkoionimoottorissa ionien kiihdyttimenä toimii verkkorakenne, joka tunnetaan myös nimellä ionioptiikka. Verkon tehtävänä on poistaa ionit kammiosta, estää neutraalin ajoaineen ulostulo, kiihdyttää poistetut ionit ja estää elektronien takaisinvirtaus. Verkon rakenne on tärkeä osa sähköstaattisten ionimoottorien toimintaa, joka on tehokkuuden, koon ja käyttöiän tasapainottelua. Näiden kriteerien pohjalta suunnitellaan tiettyyn tehtävään sopiva verkkorakenne, mutta koska moottorien toiminta-aika on useita vuosia on prioriteettina yleensä käyttöiän maksimointi. Verkkorakenne koostuu seulovasta verkosta, kiihdyttävästä verkosta ja joskus myös hidastavasta verkosta.

Kuvassa 2 on esitelty verkkoionimoottorin verkkorakenne sekä sen sähköinen potentiaali. Positiivisesti kiihdytysverkkoon nähden varattu seulova verkko nimensä mukaisesti seuloo ionit purkauskammioista ja ohjaa ne kiihdytysverkolle. Seulova verkko on suunniteltu ioneille mahdollisimman "läpinäkyväksi" minimoimalla verkon reikiä ympäröivän materiaalin määrä ja verkon paksuuden suhteen. Lisäksi seulovalla verkolla pyritään estämään neutraalin kaasun poistuminen purkauskammioista ja suojaamaan kiihdytinverkkoa sputteroinnilta, eli kun materiaaliin osuu korkeaenergisiä ioneja, niin siitä irttoa mikroskooppisia partikkeleita. Kiihdytinverkon tehtävänä on kiihdyttää ioneja. Ioneja kiihdyttää seulaverkon ja kiihdytinverkon välinen sähköinen potentiaaliero. Kiihdytysverkon negatiivinen potentiaali suojaa ionimoottoria neutralisoijakatodin tuottamien elektronien takaisinvirtaukselta, joka aiheuttaa tehonmenetystä ja pahimmillaan vahingoittaa purkauskammion osia ylikuumentamalla niitä. Kiihdytysverkot valmistetaan yleensä molybdeenistä, hiili-hiili komposiiteista tai pyrolyyttisestä hiilestä näiden eroosion kestävyys takia. Hidastusverkon tehtävänä on myös elektronien takaisinvirtauksen estäminen sekä suojata kiihdytinverkkoa kuoppa- ja uraeroosiolta (pits-and-grooves erosion). Hidastinverkko lisää ionimoottorin käyttöikää, mutta se monimutkaistaa rakennetta.[2,3,6]

Varauksensiirto törmäykset (charge exchange collisions, CEX) ovat törmäyksiä, jossa ioni ja neutraali atomi vaikuttavat keskenään siten, että neutraalilta atomilta siirtyy elektroni positiivisesti varatulle ionille. Törmäyksestä seuraa nopea neutraali atomi ja hidas ioni, jota negatiivisesti varattu kiihdytysverkko vetää puoleensa sellaisella energialla, että ioni sputteroi kiihdytysverkkoa. Nämä hitaat ionit aiheuttavat kulumista kiihdytysverkolla kahdella eri tavalla. Piippueroosiossa varauksensiirto törmäys tapahtuu seulovan verkon ja kiihdyttävän verkon välillä tai itse kiihdyttävässä verkossa, joten sputterointi tapahtuu kiihdytysverkon rei'issä suurentaen niitä. Suurempien reikien takia verkon potentiaalia pitää nostaa neutralisoijaelektronien takaisinvirtauksen estämiseksi. Lopulta piippueroosio nostaa tarvittavan potentiaalın suuremmaksi kuin jännitelähde pystyy tuottamaan ja elektronien takaisinvirtausta ei pystytä estämään tehden moottorista toimintakyvyttömän.[2,3,6]

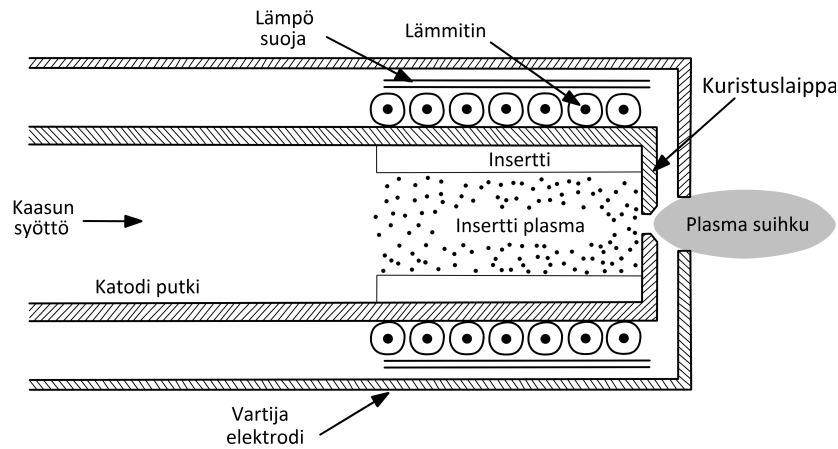


Kuva 2: Verkkoionimoottorin potentiaali, [9]

Kuoppa- ja uraeroosiossa varauksensiirto törmäys tapahtuu kiihdytysverkon jälkeen, jolloin hitaat ionit poistuvat ionisuihkusta sisäisten sähköisten voimien takia ionisuihkujen väliin, jolloin kiihdytysverkon potentiaali vetää hitaita ioneja puoleensa ja ionit törmäävät verkkorakenteeseen. Ionit sputteroivat materiaalia verkon reikien ympäriltä, mikä voi johtaa verkon rakenteen rikkoutumiseen. Takaisinvirtaavat ionit voivat myös törmätä reikien reunoihin suurentaen reikiä.[2]

4.1.3 Plasmageneraattorit

Verkkoionimoottorien plasmageneraattorina eli ionien tuottajana käytetään tasavirta (direct current, DC) elektronipommitusta ja radio- ja mikroaaltotaajuuksilla (radiofrequency, RF ja microwave, MW) plasman tuottamista. Elektronipommituksessa elektronien lähteenä toimii onttokatodi, kun taas radio- ja mikroaaltotaajuuksilla käytetään antennirakennetta, jonka tuottaman sähkömagneettisen säteilyn avulla ajoaine ionisoidaan.[2]



Kuva 3: Onttokatodin rakenne, [11]

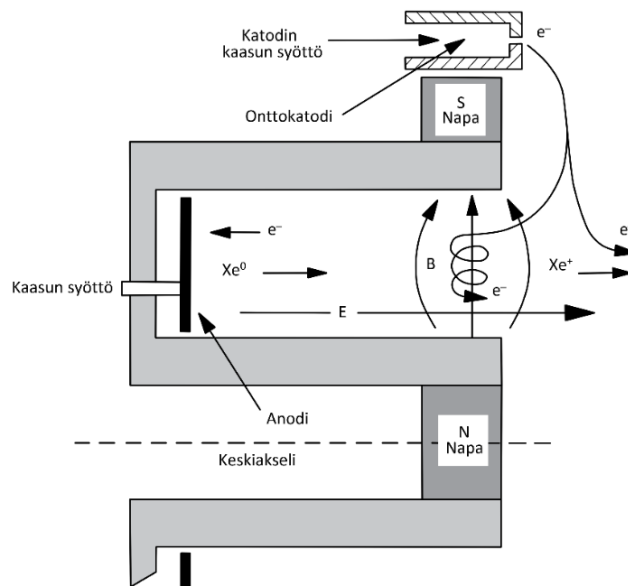
Onttokatodi rakentuu kuvan 3 mukaisesti ontosta lämmönkestävästä putkesta, jonka ulostulopäässä on kuristuslaippa (orifice plate), jonka aukosta plasma poistuu. Putken sisään on upotettu sylinterin muotoinen insertti, joka on painettu kiinni kuristuslaippaan. Insertti on onttokatodissa elektronien emittoija, joten se valmistetaan materiaalista, jonka työfunktio (irroitustyö) on pieni, jolloin elektronien terminen emissio tapahtuu matalammissa lämpötiloissa, mikä kasvattaa katodin hyötysuhdetta ja helpottaa lämpötilan hallitsemista. Katodin putkea ympäröi lämmitin joka lämmittää inserttiä terminen emission aloittamiseksi. Lämmittimen ympärillä on lämpösuoja, mikä vähentää lämpösäteilyn poistumista katodista toiminnan aikana, jolloin lämmittämisestä johtuvat häviöt minimoidaan. Onttokatodi on usein sijoitettu vartijaelektrodiin (keeper electrode) sisään. Vartijaelektrodi on positiivisesti varattu onttokatodiin nähden ja sen tehtävänä on käynnistää katodipurkaus, pitää yllä katodin toimintaa ja lämpötilaa häiriön sattuessa sekä suojella onttokatodin kuristuslaippaa ja lämmitintä suurienergisiltä ioneilta. Nämä ionit voivat vahingoittaa onttokatodia lisäten täten onttokatodin ja myös täten ionimoottorin käyttöikä. Onttokatodi toimii lämmittämällä inserttiä, josta emittoituvat elektronit ionisoivat katodin sisälle syötetyn ajoaineen muodostaen katodiplasmaa. Katodipurkaus syntyy kun katodiplasman elektronit poistetaan kuristuslaipan läpi ionimoottoriin tai neutralisoijakatodin tapauksessa ionisuihkuun.[2,12]

Radioaaltoataajuuksilla plasmaa tuotetaan kiihdyttämällä elektroneja oskiloivassa sähkömagneettikentässä, joka toimii radioaaltojen taajuudella. Kiihdyttämisen aikana elektronit törmäävät ajoaineeseen ionisoiden sen muodostaen plasmaa. Irronneita elektroneja taas voidaan kiihdyttää ja niillä voidaan ionisoida lisää ajoainetta, joten plasman tuottaminen on itseään ylläpitävää. RF:n hyviä puolia on ionimoottoreiden plasmantuotossa on vähemmän virtalähteitä ja onttokatodeja (käyttöikä) verrattuna onttokatodilla plasmaa tuottavaan ionimoottoriin. Huonoina puolina RF:ssä on antennin eristäminen plasmalta ja eristeistä rakennetun purkauskammion kestävyys. MW:n toimintaperiaate on samantapainen kuin RF:n, mutta siinä käytetään mikroaaltoja radioaaltojen sijaan. Näiden kahden erona MW:ssä plasma absorboi mikroaaltoja itseensä vain oikeissa olosuhteissa, jos mikroaaltojen taajuus on liian suurta tai plasman tiheys on liian pientä mikroaaltosäteily heijastuu plasmasta. Oikeissa olosuhteissa elektronit kuumentuvat, joka johtaa törmäyksiin ajoaineen kanssa ja ajoaineen ionisoitumiseen. Hyötynä MW:n purkauskammion seinät voidaan valmistaa RF:sta poiketen muistakin kuin eristeistä.[2,13]

4.2 Hall-ilmiöön perustuva ionimoottori

Hall-ilmiöön perustuvat ionimoottorit ovat sähköstaattisia ionimoottoreita, joiden toimintaperiaatteessa on ajoaineen ionisoinnissa hyödynnetty Hall-ilmiötä. Tämän seuraksena Hall ionimoottorit ovat rakenteeltaan yksinkertaisempia kuin verkkoionimoottorit (vrt. kuvat 1 ja 4). Hall ionimoottorien ominaisimpulssi ja käyttöikä ovat pienempiä kuin verkkoionimoottoreilla, mutta Hall ionimoottoreilla on suurempi työntövoima ja parempi työntövoimatehosuhde, joten kokonaisimpulssi on verrattavissa verkkoionimoottoreihin. Hall ionimoottoreissa Hall-ilmiö syntyy moottorin ulkopuolisen onttokatodin ja moottorin sisäpuolisen anodin välille syntyvän sähkökentän ja tätä kohtisuorassa olevan magneettikentän välille, missä katodilta tulevat elektronit jäävät pyörimään kenttäviivojen ympärille, jossa ne ionisoivat ajoaineen. Hall ionimoottoreita on rakenteeltaan kahta eri tyyppiä. Toisen tyyppin plasmakanava on valmistettu eristeestä (Hall effect thruster, HET) ja toisen (thruster

with anode layer, TAL) kanava on valmistettu johtavasta metallista. TAL tyypissä on lyhyempi ioneja kiihdyttävä sähkökenttäalue, kuten kuvia 4 ja 5 vertaamalla nähdään. Rakenne-eroista huolimatta HET ja TAL ionientuotanto ja kiihdyttäminen tapahtuu samalla tavalla. TAL:iä on yksivaiheista ja kaksivaiheista, joiden erona on se että kaksivaiheisessa anodin ja katodin potentiaalien välillä on välielektrodi, joka vähentää eroosiota.[2,3,8,14]

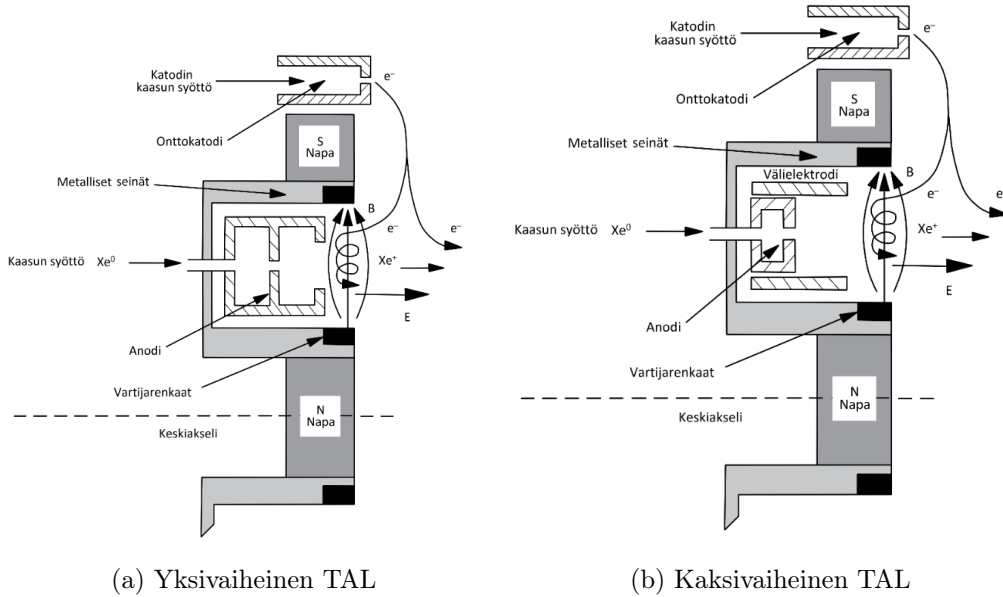


Kuva 4: HET rakenne[15]

4.2.1 Rakenne ja toimintaperiaate

HET:in rakenne on esitetty kuvassa 4. HET:in rakenne koostuu eristeestä yleensä keraamiikasta valmistetusta purkauskanavasta, sen pohjalla olevasta anodista, purkauskanavaa ympäröivistä sähkömagneeteista ja onttokatodista. Kuvassa 5 esitetyn TAL:in rakenne eroaa HET:sta lyhyemmän katodipotentiaaliin varatun metallisen purkauskammion ja vartijarenkaan lisäämisen vuoksi.[2,16]

HET:ssa ajoaine syötetään purkauskanavan pohjalla olevasta suuttimesta purkauskanavaan, jossa ajoaine ionisoidaan ulkopuolisen onttokatodin tuot-



Kuva 5: TAL rakenne[16]

tamilla elektroneilla. Onttokatodin ja purkauskanavan pohjalla olevan anodin välille syntyy keskiakselin suuntainen sähkökenttä. Onttokatodin tuottamat elektronit pyrkivät anodille, mutta purkauskanavan ulkopuolella olevien sähkömagneettien tuottama magneettikenttä on kohtisuorassa sähkökenttää vastaan estäen elektroneja virtaamasta suoraan anodille. Nämä elektronit jäävät pyörimään magneettikenttien kenttäviivojen ympärille, kunnes ne törmäävät ajoaineeseen, kammion seiniin tai anodille. Ajoaine ionisoituu tehokkaasti, koska elektronien kulkema matka moottorissa kasvaa lisäten ionisoitumistodennäköisyyttä sekä ajoaineen hyödyntämistä. Ionisoitumisen jälkeen sähkökenttä kiihdyttää ajoaineen pois, joka vetää onttokatodilta tulleita elektroneja mukanaan neutralisoiden ionisuihkun. Magneettikenttä myös muodostaa ionilissin, joka ohjaa ioneja pois purkauskanavan seinistä ja kohdistaa ne ionisuihkuksi. Yksivaiheinen TAL eroaa toiminnaltaan HET:sta vain vähentämällä elektronihäviötä katodipotentiaaliin varatun purkauskammion ja vartijarenkaan takia. Kaksivaiheinen TAL eroaa yksivaiheisesta TAL:stä rakenteellisesti vain välielektrodin lisäyksellä. Ionisoitumisvaihe tapahtuu anodin ja välielektrodin välillä ja kiihdytysvaihe onttokatodin ja välielektrodin välillä.

lä. Hyötynä tästä jakamisesta on ionisoitumisvaiheessa ionien pieni energia, joten pienien energiset törmäykset välielektrodin kanssa on eroosion kannalta parempi vaihtoehto kun suurienergiset törmäykset purkauskanavan seinien kanssa.[2,16]

5 Sähkötermiset moottorit

Sähkötermiset moottorit eivät suoranaisesti ole ionimoottoreita, koska ionien tuottaminen ei ole välttämätöntä moottorin työntövoiman tuottamiselle. Sähkötermisillä moottoreilla on kuitenkin paljon yhteistä ionimoottoreiden kanssa, joten ne kuuluvat tämän tutkielman aihealueeseen.

Yleisesti sähkötermisissä moottoreissa ajoaineen kiihdyttäminen tapahtuu kuumentamalla ajoainetta sähköisesti, jonka jälkeen ajoaine ohjataan suuttimesta (joko kiinteä tai magneettikenttien muodostama) moottorin ulkopuolelle, jolloin ajoaineen terminen energia muutetaan työntövoimaksi. Sähkötermisten moottoreiden ajoaineen poistonopeuksia voidaan arvioida karkeasti käyttämällä kaavaa

$$\frac{1}{2}v_{ex}^2 = \frac{1}{2}v_{ex}^2 + c_p(T_c - T_e) \approx c_p T_c \Rightarrow v_{ex} \leq \sqrt{2c_p T_c}, \quad (4)$$

missä v_{ex} on poistonopeus, c_p on ajoaineen ominaislämpökapasiteetti vakio-paineessa massayksikköä kohti, T_e on poistolämpötila ja T_c on kammion suurin mahdollinen lämpötila.[6] Sähkötermisten moottoreiden ajoaineina käytetään yleensä joko ammoniakkia tai hydratsiinia näiden hajoamistuotteiden keveyden ja kaasuseoksien korkeiden ominaislämpökapasiteettien takia. Sähkötermisten moottoreiden ajoaineen maksimilämpötilaa ja täten ominaisimpulssia rajoittaa moottorien osien sulamispisteet. Sähkötermisten moottoreiden haasteita on osien lämmönkestävyys ja lämmönsiirto sekä sisäisten tilojen ja molekyylien hajoamiseen kuluva energia, jota ei voi hyödyntää (frozen flow losses).[3,6]

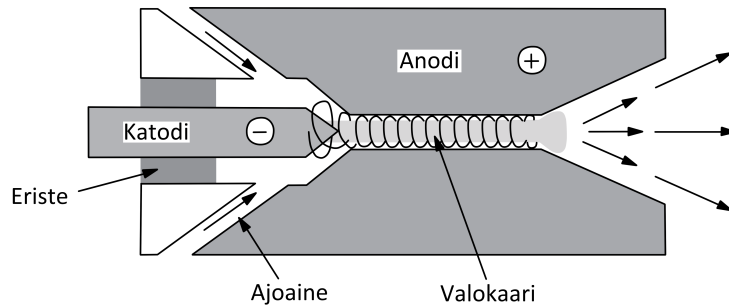
5.1 Resistojet

Resistojet on sähköterminen moottori, missä ajoainetta kuumennetaan joko lämmittämällä purkauskammion seiniä tai purkauskammion sisällä olevan lämmittimen avulla. Resistojetin toimintaa rajoittaa kammion seinien ja/tai lämmittimen lämmönkestävyys, mikä rajoittaa lämpötilan noin 3000 K, mistä johtuen poistonopeudet jäävät vedylläkin alle 10 000 m/s, vaikkakin poistonopeuden ovat silti yli kaksinkertaisia kemiallisten rakettimoottorien poistonopeuksiin. Pieni poistonopeus rajoittaa resistojetin ominaisimpulssin 300 s (vrt. verkkoionimoottori 2500-3600 s). Tyypillisessä resistojetissä käytetään ajoaineena katalyytillä hajoitettua hydratsiinia ja se saavuttaa 3500 m/s poistonopeuden ja tuottaa työntöä 0,3 N 750 W teholla ja voi saavuttaa 80 % hyötysuhteen. Muihin haasteisiin kuuluu eristeiden ja lämmittimien kestävyys käyttölämpötiloissa, mutta samalla minimoitava lämmön karkaaminen hyötysuhteen parantamiseksi. Hyviä puolia resistojettien käytössä on niiden käyttöönoton helppous, koska ne on helppo integroida jo valmiiksi käytössä oleviin ajoainetankkeihin sekä näiden pieni käyttöjännite. Resistojetit pystyvät myös käyttämään ajoaineena biojätteitä, kuten vesihöyryä ja hiilidioksidia.[2,3,6,17]

5.2 Arcjet

Arcjet on sähköterminen moottori, jonka rakenne on esitetty kuvassa 6. Arcjetissä ajoainetta kuumennetaan katodin ja suuttimena toimivan anodin välille syntyvän voimakkaan valokaaren avulla. Arcjettejä on suunniteltu toimimaan tasa- ja vaihtovirralla. Vaihtovirralla toimivan arcjetin jännitteentasausta (power conditioning) on helpompaa kuin tasavirta arcjetissä, mutta vaihtovirta arcjetin käyttöikä on lyhyempi. Tyypillinen arcjet voi nostaa ajoaineen lämpötilan yli 10000 K nostoen poistonopeuden hydrasiinillä jopa 6000 m/s 40 % hyötysuhteella. Arcjetin heikkouksia ovat heikko hyötysuhde verrattuna muihin sähköisiin työntövoiman lähteisiin, korkea käyttöjännite, kuumuudesta johtuva osien (varsinkin elektrodien) kuluminen ja rikkoutuminen. Katodin ja anodin eroosion takia arcjetin käyttöikää saadaan kasvatettua minimoimalla käynnistysten määrä. Arcjetin hyviä puolia ovat korkea

ominaisimpulssi ja helppous integroida jo valmiiksi käytössä oleviin ajoainetankkeihin.[2,3,6,18]



Kuva 6: Arcjetin rakenne[19]

5.3 Induktiolla ja säteilyllä lämpöä tuottavat laitteet

Muita yleisiä sähkötermisiä moottoreita ovat radioaalloilla ja mikroaalloilla ajoainetta kuumentavat moottorit, jotka toimivat samalla periaatteella kuin aikaisemmin mainitut plasmageneraattorit. Näitä moottoreita voidaan käyttää jatkuvana (steady) tai sykkivänä (pulsed) tilassa. Nämä ovat myös elektrodittomia, joten eroosio on pienempi ongelma kuin arcjeteissä. Myös laserilla ajoainetta kuumentavia sähkötermisiä moottoreita on tutkittu.[3,20]

6 Sähkömagneettiset ionimoottorit

Sähkömagneettisten ionimoottorien työntövoima syntyy kiihdyttämällä ioneita, kuten sähköstaattisissa ionimoottoreissa, mutta toisin kuin sähköstaattisissa ionimoottoreissa ionien kiihdyttäminen toteutetaan joko Lorentzin voimalla tai sähkömagneettikentillä. Verrattuna sähköstaattisiin ionimoottorei-

hin sähkömagneettisilla ionimoottoreilla voidaan käyttää kuumempaa ja tiheämpää plasmaa, joka johtaa suurempiin poistonopeuksiin ja ajoaineen tehokkaampaan käyttöön, joten sähkömagneettiset ionimoottorit sopivat hyvin avaruusaluksien työntövoiman lähteeksi. Heikkoutena sähköstaattisiin ja -termisiin moottoreihin verrattuna sähkömagneettiset moottorit ovat teknisesti vaikeampia toteuttaa ja analyyttisesti vaikeampia mallinnettavia, joten niiden kehitys on jäänyt sähköstaattisten ja -termisten moottorien jälkeen. Sähkömagneettiset ionimoottorit voidaan jakaa kolmeen eri osajoukkoon, tasaiseen (steady), pulssimuotoiseen (pulsed) ja etenevään aaltoon (traveling wave). Tasaisessa sähkömagneettisessa moottorissa magneettikenttä, sähkövirtatiheyden kuviot (pattern) ajoaineessa, ajoaineen virtausnopeus ja ajoaineen termodynaamiset ominaisuudet pysyvät vakiona ajan suhteen vakiona, kun taas pulssimuotoisessa nämä vaihtelevat ajan suhteen. Tasainen voidaan jakaa vielä kahteen magneettikentän lähteen mukaan, toisessa magneettikenttä syntyy ulkoisesti joko käämeillä tai magneeteilla tai sisäisesti ajoaineen itseindusoinnilla. Pulssimuotoinenkin voidaan jakaa kahteen osajoukkoon: induktiivisesti kytkettyyn tilaan, (inductively coupled mode) jossa ajoaineen ulkopuolisessa virtapiirissä tapahtuvat virran muutokset indusoivat ajoaineeseen purkausvirran ja sarjaankytkettyyn tilaan, (series-coupled mode) jossa ajoaineen purkausvirran saavat aikaan elektrodit. Etenevässä aallossa ulkopuoliset käämit muodostavat jatkuvan sähkömagneettisen aallon, joka kiihdyttää ionisoituneen ajoaineen.[3,6]

6.1 Magnetoplasmadynaaminen ionimoottori

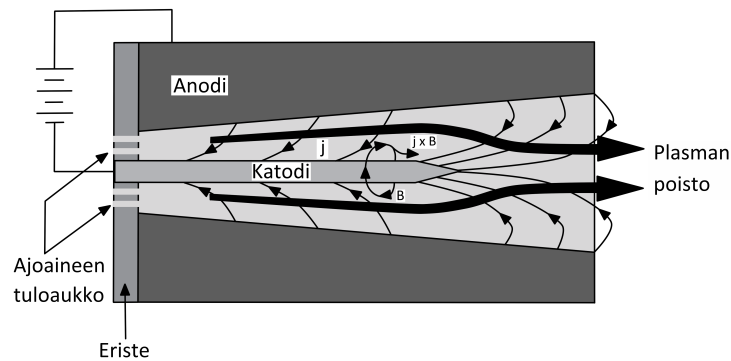
Magnetoplasmadynaaminen ionimoottori (Magnetoplasma dynamic thruster, MPDT, kutsutaan joskus myös Lorentz Force Accelerator, LFA) on sähkömagneettinen ionimoottori, joka on jatkokehitystä sähkötermiselle arcjetille (vrt. kuvia 6 ja 7) ja ovat olleet kehitteillä jo 1960-luvulta lähtien parantaen pikkuhiljaa tehokkuutta. MPDT:t ovat rakenteeltaan yleensä kuvan 7 mukaisia ja muistuttavat rakenteeltaan arcjettejä, eli keskeistä katodia ympäröi sylinterimäinen anodi. Sylinterin pohjasta suihkutettu ajoaine ionisoidaan katodin ja anodin välissä olevan voimakkaan valokaaren avulla. Tämä po-

tentiaaliero tuotetaan tasavirtalähteellä. Katodille palaava sähkövirta itseindusoi magneettikentän katodin ympärille. Pienitehoisille MPDT:lle (<200 kW) itseindusoitu magneettikenttä ei ole tarpeeksi vahva tehokkaaseen toimintaan vaan sitä tukee ulkoisesti solenoideilla tuotettu magneettikenttä. Kun tämä magneettikenttä on tarpeeksi vahva se aiheuttaa aksiaalisia ja radiaalisia voimia ionisoituneeseen ajoaineeseen kiihdyttäen sitä pois moottorista, sekä keskittää ja puristaa plasman keskiakselille. Pääasiassa Lorentzin voima sekä osittain plasman laajeneminen tuottavat plasmalle suuria poistonopeuksia (jopa yli $100\,000 \frac{m}{s}$ vrt. verkkoionimoottori $30\,000 \frac{m}{s}$), tuottaen suuria määriä työntöä (20-200000 mN vrt. verkkoionimoottori 0,005-500 mN). Ominaisimpulssi on verrattavissa verkkoionimoottoreihin.[2,3,6,8,21,22]

MPDT:lla on kaksi eri tapaa tuottaa tarvittava magneettikenttä, itseindusoi tu magneettikenttä ja ulkopuolinen magneettikenttä. Itseindusoidussa magneettikentässä ajoaineen kiihdytys tapahtuu katodille kulkevan virran aiheuttaman magneettikentän seurauksena. Itseindusontia käytetään MPDT:ssa joiden teho on yli 200 kW. Ulkopuolisessa magneettikentässä ajoaineen kiihdyttämistä ja plasman kasassa pysymistä tehostetaan käyttämällä ulkopuolisen solenoidin tuottaman magneettikentän avulla. Tämän magneettikentän avulla voidaan tuottaa sama työntö vähemmällä ajoaineella. Tätä tapaa käytetään MPDT:lle joiden teho on alle 200 kW. Riippuen MPDT:n rakenteesta käytössä on kaksi erilaista toimintatapaa, tasainen toiminta (steady state) ja sykkivä toiminta (pulsed state tai quasi-steady state). Tasaisessa toiminnassa ionisaatio on nimensä mukaisesti jatkuvaa, kun taas sykkivässä toiminnassa kapasitiivisen järjestelmän kondensaattoreiden purkautuminen ja latautuminen ajoittavat ionisaatiota. Näiden pulssien kesto on yleensä millisekuntien luokkaa. Pulssien seurauksena sykkivä toiminta saa aikaan suurempia virtoja ja magneettikenttiä kuin tasaisesti toimiva. Tämän takia sykkivä toiminta ei tarvitse yhtä suurta tehonlähdettä kuin tasaisesti toimiva, mutta syke aiheuttaa enemmän käyttöikää vähentävää katodieroosiota verrattuna tasaiseen toimintaan.[3,6]

Itseindusoiivat yli megawatin tasaisesti toimivat MPDT:t ovat varsin käyttökelpoisia moottoreita paljon työntöä vaativiin avaruusmatkoihin, kuten mie-

hitettyihin lentoihin Marsiin, koska moottorit ovat yksikertaisia, kooltaan pieniä ja vankkarakenteisia. Ongelmattomia MPDT:t eivät vielä ole vaan niiden heikkoutena ovat noin 10 % - 40 % hyötysuhde, tehonlähteiden riittämättömyys sekä katodieroosio.[3]



Kuva 7: MPDT:n rakenne[23]

6.2 Muunneltavan ominaisimpulssin magnetoplasmaraketin

Muunneltavan ominaisimpulssin magnetoplasmaraketti (Variable Specific Impulse Magnetoplasma Rocket, VASIMR) on sähkömagneettinen ionimoottori, jolla on sähkötermisiä (induktio ja säteily) ominaisuuksia. VASIMR juuret johtavat 1970-luvun loppuun, jolloin konsepti kehitettiin, mutta vasta viime vuosikymmenillä teknologian kehittyminen on mahdollistanut VASIMR:n rakentamisen koekäyttöön. VASIMR:ssa on käytetty ajoaineena vetyä, heliumia, neonia, kryptonaa, argonia ja jodia. VASIMR:in toiminta tapahtuu kolmessa vaiheessa. Ensimmäinen vaihe helikonipurkaus (helicon discharge), missä ajoaine ionisoidaan radioaalloilla (RF). Toisessa vaiheessa plasma kuumennetaan ioni synkrotoni resonanssi lämmityksen (ion cyclotron resonance heating, ICRH) avulla jopa 1000000 K. Kolmantena vaiheena toimii magneettinen suutin, joka ohjaa kuuman plasman pois raketista tuottaen työntöä.

VASIMR:n hyviä puolia on sen kyky muunnella sen ominaisimpulssia muuttamalla plasman lämpötilaa. Korkeammalla plasman lämpötilalla saadaan aikaan pienempi ajoaineen kulutus ja suurempi ominaisimpulssi työntövoiman kustannuksella. VASIMR voi siis vaihdella suuremman työnnön ja ominaisimpulssin välillä tarpeen vaatiessa. VASIMR on myös täysin elektroditon. VASIMR:issa ei ole myös juurikaan liikkuvia osia. Heikkouksina VASIMR:ssa on lämmönsäätely ja suprajohtavat sähkömagneetit. VASIMR tuottaa valtavasti lämpöä, joka pitää saada johdettua pois raketin materiaalien sulamisen välttämiseksi. VASIMR tarvitsee toimiakseen suprajohtavat sähkömagneetit, jotka pitävät plasmaa kasassa. Niiden tuottama suuri magneettikenttä voi kuitenkin vaikuttaa muihin laitteisiin ja magnetosfääri voi aiheuttaa epätoivottua vääntöä raketille.[13,24,25,26,27,28]

7 Johtopäätökset

Sähköisellä propulsiolla ja ionimoottoreilla on takanaan jo sata vuotta innovaatiota ja kehitystä, mutta vasta viimeisen 30 vuoden aikana sähköinen propulsio on noussut varteenotettavaksi vaihtoehdoksi pitemmille avaruusmatkoille. Varsinkin MPDT ja VASIMR ovat mielestäni parhaat vaihtoehdot lähitulevaisuuden miehitettyjen Mars-lennon työntövoimanlähteeksi. Tulevaisuudessa sähköistä propulsiota voidaan ehkä tavata myös Maan ilmakehässä lifterien muodossa. Ionimoottoreilla ja yleisesti sähköisellä propulsiolla on edessään loistava tulevaisuus ja voimme vain odottaa miten paljon kehitystä tapahtuu seuraavan sadan vuoden aikana.

Viitteet

1. Choueiri, E. Y., A Critical History of Electric Propulsion: The First 50 Years (1906–1956), Journal of Propulsion and Power, Vol. 20, No. 2, 2004, s. 193-203
2. Goebel, D.M. ja Katz, I., Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters, JPL Space Science and Technology Series, 9780470436264,

John Wiley & Sons, 2008

3. Jahn, R. G. ja Choueiri, E. Y., Electric Propulsion, Encyclopedia of Physical Science and Technology, 2003, s. 125-141

4. Fowles, G.R. ja Cassiday, G.L., Analytical mechanics, 7. painos, 9780534494926, Thomson Brooks/Cole, 2005, s. 312-319

5. Sutton, G.P. ja Biblarz, O., Rocket Propulsion Elements, 9781118753910, Wiley, 2016

6. Jahn, R.G., Physics of Electric Propulsion, Dover Books on Physics, 9780486450407, Dover Publications, 2006

7. Adams, R. ja Richardson, Georgia, Using the Two-Burn Escape Maneuver for Fast Transfers in the Solar System and Beyond, 10.2514/6.2010-6595, 2010

8. Choueiri, Edgar. New Dawn for Electric Rockets. Scientific American. 300. 58-65. 10.1038/scientificamerican0209-58. 2009

9. Alkuperäinen kuva: NASA Glenn Research Center, muokannut ja suomentanut Mira Tikkanen

10. Alkuperäinen kuva: Goebel, D.M. ja Katz, I., Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters, JPL Space Science and Technology Series, 9780470436264, John Wiley & Sons, 2008 s.192, muokannut ja suomentanut Mira Tikkanen

11. Alkuperäinen kuva: Goebel, D.M. ja Katz, I., Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters, JPL Space Science and Technology Series, 9780470436264, John Wiley & Sons, 2008, s.247, muokannut ja suomentanut Mira Tikkanen

12. Goebel, Dan ja Jameson, Kristina ja Katz, Israel ja Mikellides, Ioannis.. Potential fluctuations and energetic ion production in hollow cathode discharges. Physics of Plasmas. 14. 10.1063/1.2784460. 2007

13. E. A. Bering, F. Chang-Diaz ja J. Squire, The use of rf waves in space propulsion systems, URSI Radio Science Bulletin, vol. 2004, no. 310, s. 92-106, 2004.

14. Zhurin, V ja Kaufman, Harold ja Robinson, Raymond, Physics of closed drift thruster, Plasma Sources Science and Technology vol 8, 10.1088/0963-0252/8/1/021, 1999

15. Goebel, D.M. ja Katz, I., Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters, JPL Space Science and Technology Series, 9780470436264, John Wiley & Sons, 2008 s. 326, muokannut ja suomentanut Mira Tikkanen
16. Zhurin, V ja Kaufman, Harold ja Robinson, Raymond, Physics of closed drift thruster, Plasma Sources Science and Technology vol 8, 10.1088/0963-0252/8/1/021, 1999, R3, muokannut ja suomentanut Mira Tikkanen
17. Page, R. ja Stoner, W. ja Barker, L., A design study of hydrazine and biowaste resistojets, 1986
18. Wallner, Lewis ja Jr, Czika, ARC-Jet Thruster for Space Propulsion, 1965
19. Alkuperäinen kuva: Bock, D. ja Herdrich, Georg ja Lau, Matthias ja Lengowski, Michael ja Schönherr, Tony ja Steinmetz, Fabian ja Wollenhaupt, B. ja Zeile, Oliver ja Röser, H.-P, Electric Propulsion Systems for Small Satellites: The Low Earth Orbit Mission Perseus, EUCASS Proceedings Series, 10.1051/eucass/201102629, 2012, s. 629-638, muokannut ja suomentanut Mira Tikkanen
20. Ziemer, John, Laser Ablation Microthruster Technology, 33rd Plasmadynamics and Lasers Conference, 10.2514/6.2002-2153, 2002
21. Choueiri, E., Scaling of Thrust in Self-Field Magnetoplasma-dynamic Thrusters, Journal of Propulsion and Power - J PROPUL POWER vol. 14, 10.2514/2.5337, 1998, s. 744-753
22. <https://www.nasa.gov/centers/glenn/about/fs22grc.html>, viitattu 31.3.2020
23. Alkuperäinen kuva: Jahn, R. G. ja Choueiri, E. Y., Electric Propulsion, Encyclopedia of Physical Science and Technology, 2003, s. 135, muokannut ja suomentanut Mira Tikkanen
24. Yalamarthy, A., Optimization of the Thrust Produced by a Plasma Flow in a Magnetic Nozzle, 10.13140/RG.2.1.1085.8401, 2015
25. Arefiev, A. ja Breizman, B., Theoretical components of the VASIMR plasma propulsion concept, Physics of Plasmas vol. 11, 10.1063/1.1666328, 2004, s. 2942-2949
26. Cassady, L., Longmier, B., Olsen, C., Ballenger, M., McCaskill, G., Ilin, A., Carter, M., Glover, T., Squire, J., Diaz, F. ja Bering, E., ASIMR Performance Results, 10.2514/6.2010-6772, 2010
27. Chang Diaz, F. R., "The VASIMR Rocket" Scientific American vol 283,

marraskuu 2000.

28.Chang Diaz, F. R., Squire, Jared P., Petro, Andrew, Nguyen, Tri X, The Evolution of the VASIMR Engine, 2001